

砂防鋼構造物研究会 ○飯塚幸司 石川信隆
 防衛大学校 香月 智
 同上 堀口俊行
 (一財)砂防・地すべり技術センター 嶋 丈示
 政策研究大学院大学 水山高久

1. 緒言

近年、異常気象の影響により、極めて大きな土石流が発生する事象が多くなり、砂防堰堤が破壊する事例が報告されている。昨年著者ら¹⁾は、土石流流体力の不確定性（平均値と標準偏差）を考慮した砂防堰堤袖部のせん断破壊について検討を試みたが、今回は、土石流中の礫のばらつきを考慮した砂防堰堤袖部の滑動破壊について安全性照査を試みるものである。まず礫衝撃力の確率変数が正規分布に従う場合について検討する。次に、目標安全性指標を用いた部分係数法を用いて、礫のばらつきを考慮した砂防堰堤袖部の必要鉄筋量の算定法について検討するものである。

2. 性能関数と安全性指標の定義

2.1 性能関数の定義

土石流外力を S 、砂防堰堤の抵抗力を R とすると、性能関数は $Z = R - S$ と定義し、 $Z > 0$ のとき安全であり、 $Z \leq 0$ のとき破壊と定義する。すなわち、 $Z \leq 0$ となる確率が破壊確率 P_f である。外力 S と抵抗力 R がともに正規確率変数のとき、性能関数 Z も正規確率変数になり、性能関数の平均値 $\bar{Z}$ と標準偏差 σ_Z は、次式で表される^{2), 3), 4)}。

$$\bar{Z} = \bar{R} - \bar{S}, \quad \sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (1a, 1b)$$

ここに、 $\bar{R}, \bar{S}$: 抵抗力と外力の平均値、 σ_R, σ_S : 抵抗力と外力の標準偏差。

2.2 安全性指標の定義

安全性指標 β は、図-1に示すように破壊をもたらす破壊点($Z = 0$)から平均値がどの程度離れているかを示す尺度である。すなわち、 $\bar{Z}$ が σ_Z の何倍の位置にあるかを、 β で示すことにより、安全性余裕の目安になる。 β が大きいかほど、破壊確率 P_f は小さくなる。

$$\beta = \frac{\bar{Z}}{\sigma_Z} = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}, \quad P_f = 1 - \phi(\beta) \quad (2a, 2b)$$

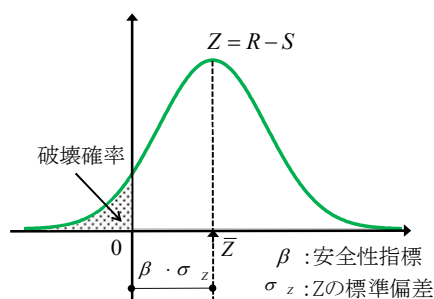


図-1 安全性指標の定義

3. 目標安全性指標を用いた部分安全係数設計法

式(2a)の β が、ある目標安全性指標 β_T （確定論における安全率のような値）を上回るような設計法を試みる。すなわち、 $\beta \geq \beta_T$ より、式(2a)は変動係数を用いて次式になる。

$$\begin{aligned} \bar{R} - \bar{S} &\geq \beta_T \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} = \alpha \beta_T (\sigma_R + \sigma_S) \\ &= \alpha \beta_T (V_R \bar{R} + V_S \bar{S}) \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 V_R : 抵抗力の変動係数、 V_S : 外力の変動係数

$$\begin{aligned} \alpha &= \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} / (\sigma_R + \sigma_S), \\ V_R &= \sigma_R / \bar{R}, \quad V_S = \sigma_S / \bar{S} \end{aligned}$$

式(3)を展開すると、次式のような部分安全係数による設計式が得られる。

$$\phi R_n \geq \gamma S_n \quad (4)$$

ただし、

$$\phi = \frac{(1 - \beta_T \alpha_R V_R)}{R_n} \bar{R}, \quad \gamma = \frac{(1 + \beta_T \alpha_S V_S)}{S_n} \bar{S}$$

R_n, S_n : 抵抗値および外力の公称値。

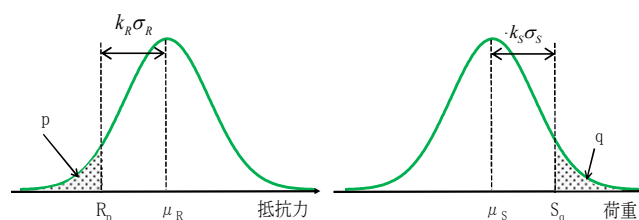
ここで、公称値＝平均値とすると、式(4)は次式になる。

$$(1 - \beta_T \alpha_R V_R) \bar{R} \geq (1 + \beta_T \alpha_S V_S) \bar{S} \quad (5)$$

さらに、公称値を図-2に示すような特性値を用いる。つまり、抵抗値はなるべく低目に、外力はなるべく高目にした特性値 R_p, S_q を用いる。

$$\begin{aligned} R_p &= \bar{R} - k_R \sigma_R = \bar{R} (1 - k_R V_R), \\ S_q &= \bar{S} + k_S \sigma_S = \bar{S} (1 + k_S V_S) \end{aligned} \quad (6a, 6b)$$

ただし、 k_R, k_S は平均値と特性値を関係づける係数で、 R_p の非超過確率と S_q の超過確率が共に0.01以内のとき、 $k_R = k_S = 2.32$ となる。



(a) Rの特性値 R_p

(b) Sの特性値 S_q

図-2 特性値

よって、式(4)に式(6)を代入すれば、特性値を用いた設計式が得られる。

$$\phi R_p \geq \gamma S_q \quad (7)$$

ただし、

$$\text{強度係数} \quad \phi = \frac{1 - \alpha_R \beta_T V_R}{1 - k_R V_R} \quad (8a)$$

$$\text{荷重係数} \quad \gamma = \frac{1 + \alpha_S \beta_T V_S}{1 + k_S V_S} \quad (8b)$$

4. 砂防堰堤袖部の滑動安定性照査

4.1 検討-1

図-3 のようなコンクリート砂防堰堤袖部の場合、礫衝撃力のみ作用するときの破壊確率を求める。

(1) 抵抗力 R は、

$$\begin{aligned}\bar{R} &= f \sum V + \tau_c L + \tau_s A_s \\ &= 0.8 \times 574.1 + 392 \times 3.0 + 99,960 \times 0.0011613 \\ &= 1751 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

ただし、 f : 摩擦係数、 $\sum V$: 袖部の重量、

τ_c : コンクリートのせん断強度
(ここでは $40 \text{ t/m}^2 = 392 \text{ kN/m}^2$ を用いた⁶⁾),

τ_s : 鉄筋のせん断強度

(ここでは $10,200 \text{ t/m}^2 = 99,960 \text{ kN/m}^2$ を用いた),

A_s : 鉄筋断面積 (ただし、単位 m^2/m)

ここで、変動係数 $V_s = 0.2$ とすると、抵抗力の標準偏差は

$$\sigma_R = 0.2 \times 1751 = 350.2 \text{ kN/m}$$

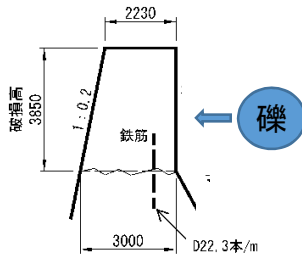


図-3 コンクリート堰堤の袖部^{1), 6)}

(2) 外力の礫衝撃力 S として、ここでは針原川調査報告書⁶⁾の衝撃力を平均値として用いる。

$$\bar{S} = 887.9 \text{ kN/m}$$

外力の変動係数とすると、

$$\sigma_S = 887.9 \text{ kN/m}$$

(3) 安全性指標 β は、

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = \frac{1751 - 888}{\sqrt{350^2 + 888^2}} = \frac{863}{954} = 0.90$$

標準正規分布表より、 $\phi(\beta) = \phi(0.9) = 0.32$

$$P(\beta) = 0.5 + 0.32 = 0.82$$

すなわち、礫衝撃力による安全性余裕度は82%、破壊確率は18%となる。

ここで変動係数 V_s を変化させ、安全性指標 β と破壊確率 P_f の関係を見てみる。変動係数 V_s が大きくなると、安全性指標 β は小さくなり、破壊確率 P_f が大きくなる。つまり、破壊する確率が大きくなる(図-4)。

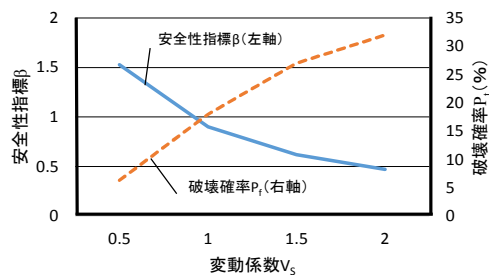


図-4 変動係数 V_s と安全性指標 β ・破壊確率 P_f との関係

4.2 検討-2

目標安全性指標を $\beta_T = 3.5$ (許容破壊確率 0.02%) としたとき、式(7)を用いて必要鉄筋量を求める。

まず部分安全係数を求める。

$$\alpha = \frac{\sqrt{350^2 + 888^2}}{350 + 888} = \frac{954}{1238} = 0.77$$

$$\phi = \frac{1 - 0.77 \times 3.5 \times 0.2}{1 - 2.32 \times 0.2} = \frac{0.46}{0.54} = 0.85$$

$$\gamma = \frac{1 + 0.77 \times 3.5 \times 1.0}{1 + 2.32 \times 1.0} = \frac{3.70}{3.32} = 1.11$$

$$R_p = \bar{R}(1 - k_R V_R)$$

$$= \bar{R}(1 - 2.32 \times 0.2) = 0.54 \bar{R}$$

$$\bar{R} = 0.8 \times 574.1 + 392 \times 3.0 + 99,960 \times A_s$$

$$\bar{S}_q = \bar{S}(1 + k_S V_S) = \bar{S}(1 + 2.32 \times 1.0)$$

$$= 888 \times 3.32 = 2948 \text{ kN}$$

$$= 1635.3 + 99,960 A_s$$

$$\text{ゆえに、} 0.85 R_p \geq 1.11 S_p$$

$$0.85 \times 0.54(1635.3 + 99,960 A_s) \geq 1.11 \times 2948 = 3272$$

$$45881 A_s \geq 2513.5$$

$$A_s \geq 0.0548 \text{ m}^2/\text{m}$$

よって、目標安全性指標 $\beta_T = 3.5$ を満足するような必要鉄筋量を求めることができた。

5. 結言

本研究は、信頼性設計法の中のレベル2を用いて砂防堰堤袖部の滑動安全性照査に適用したものである。具体的には安全性指標から破壊確率を求める方法や、ある目標安全性指標を満足するように未知数である鉄筋量を求める方法を提案したものである。

今後の課題として、信頼性設計の砂防構造物へ適用に向けて、礫径や流速の確率分布や、特性値や変動係数などについてデータを整理・検討する必要がある。

(参考文献)

- 1) 飯塚幸司, 石川信隆, 香月智, 嶋丈示, 水山高久: 土石流中のばらつきを考慮した砂防堰堤の安全性評価, 平成 29 年度砂防学会研究発表概要集, pR-32 132-133
- 2) 国土交通省 国土技術政策総合研究所, 砂防基本計画策定指針(土石流・流木対策編)解説, 2016 年 4 月
- 3) 星谷勝, 石井清: 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 昭和 61 年。
- 4) 大塚久哲: 信頼性理論と性能設計, 大塚社会基盤総合研究所, 権歌書房, 2016 年
- 5) 土木学会: 構造工学シリーズ 22 防災・安全対策技術者のための衝撃作用を受ける土木構造物の性能設計 基準体系の指針, 平成 25 年
- 6) 針原川土石流検討委員会, 針原川土石流検討委員会報告書, 平成 10 年 5 月